



Revista

Iberoamericana de

Automática

Informática Industrial



ISSN: 1697-7912. Vol. 6, Núm. 4, Octubre 2009, pp. 32-43

Modelado de Secaderos Rotatorios en Isocorriente

F. Castaño, F.R. Rubio y M.G. Ortega

*Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Univ. de Sevilla,
Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla, España
(e-mail: fercas@us.es, rubio@us.es, mortega@esi.us.es)*

Resumen: Este trabajo presenta una metodología para el modelado de secaderos rotatorios de sólidos en isocorriente. El planteamiento del modelo está basado tanto en ecuaciones diferenciales paramétricas como en el uso de algunas correlaciones que permiten simplificar su tratamiento. En el trabajo se muestran aspectos de modelado que son comunes a la mayoría de instalaciones de secado y se detallan algunos puntos que pueden ser particulares o específicos de cada planta en función de su configuración o del material de secado. Se muestran también los ensayos a los que hay que someter al material para la determinación de algunas expresiones analíticas imprescindibles en el modelo. Asimismo, se presenta la aplicación del modelado a una planta experimental de secado de arena. *Copyright © 2009 CEA.*

Palabras Clave: Secadero rotatorio, modelado, ecuaciones diferenciales, parámetros distribuidos, coeficientes de correlación.

1. INTRODUCCIÓN

El secado es sin duda uno de los procesos más antiguos conocidos por el hombre, y aparece en muchas de las manipulaciones a las que es sometido un producto a lo largo de sus fases de elaboración. Son muchos los campos donde se hace necesario este proceso y existen varias razones para disminuir la humedad de un producto, entre las cuales se podrían citar las siguientes: cumplir exigencias de calidad del producto final, reducir costes de transporte, conservar un producto durante su almacenamiento (estabilidad microbiológica), preprocesado para aumentar la capacidad de otros aparatos o instalaciones del proceso (propiedades de fluidez y viscosidad), permitir tratamientos posteriores del producto, aumentar el valor de los subproductos obtenidos, etc.

En el secado de un material están implicados principalmente dos procesos: la *transmisión de calor* para evaporar el líquido y la *transferencia de masa*, tanto la que se produce en la superficie del sólido por el líquido evaporado, como la producida por fenómenos de difusión de la humedad interna. Los factores que afectan a cada uno de estos procesos son los que determinan la rapidez de secado del material.

En el ámbito industrial, se han diseñado distintos tipos de secaderos atendiendo a las características y propiedades físicas del material húmedo a tratar (Liptak, B.G., 1998). Así, por ejemplo, se pueden mencionar secaderos:

- Rotatorios (arena, piedra, minerales, abonos, etc).
- De vacío (productos fibrosos, pulverulentos, lodos, etc).
- De lecho fluido (material granulado).
- Neumáticos o de secado instantáneo (sólidos pulverizados o micronizados).
- Solares (frutas y verduras).
- Estufas de pintura.
- De baja temperatura (productos cárnicos, tabaco, etc).

Los secaderos se pueden clasificar, atendiendo a la forma de transferir el calor, en directos e indirectos con subclases de continuos e intermitentes. Los directos utilizan gases calientes

en contacto directo con el sólido húmedo, mientras que, por el contrario, los indirectos transmiten el calor a través de las paredes de los elementos que contienen al sólido húmedo.

Este trabajo se centra en el modelado de *secaderos rotatorios directos continuos en isocorriente* (es decir, que los gases calientes y el sólido húmedo se mueven en el mismo sentido). Si bien el estudio trata de ser general, éste se ha particularizado para una planta experimental de secado situada en el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Sevilla y que utiliza como sólido arena fina.

El resto del artículo se ha organizado de la siguiente manera: en la sección 2, se presenta la descripción de una instalación típica de secado; seguidamente en la sección 3, se enumeran algunos trabajos de investigación relacionados con plantas o instalaciones de secado y se plantea un modelado de general de las mismas en la sección 4. La sección 5 muestra la aplicación del modelo a la planta experimental y en la 6 se detallan los ensayos a los que se somete el material para determinar la velocidad de evaporación. Finaliza el artículo con la presentación de resultados de validación del modelo.

2. DESCRIPCIÓN DE UNA INSTALACIÓN INDUSTRIAL DE SECADO TÍPICA

Para hacer viable económicamente el tratamiento de secado de algunos sólidos es necesario trabajar en un proceso continuo y alcanzar grandes flujos de evaporación. En los secaderos rotatorios esto se consigue mediante tres actuaciones combinadas: la primera se basa en incrementar la temperatura (aportando energía al proceso con gas de combustión); la segunda consiste en renovar el gas en contacto con el sólido mediante una corriente forzada del gas caliente; y la tercera, favorecer el contacto sólido-gas mediante el volteo del material.

Teniendo presente lo anterior, en una instalación industrial de secado de sólido mediante cilindro rotatorio se pueden distinguir tres partes, como se muestra en la figura 1:

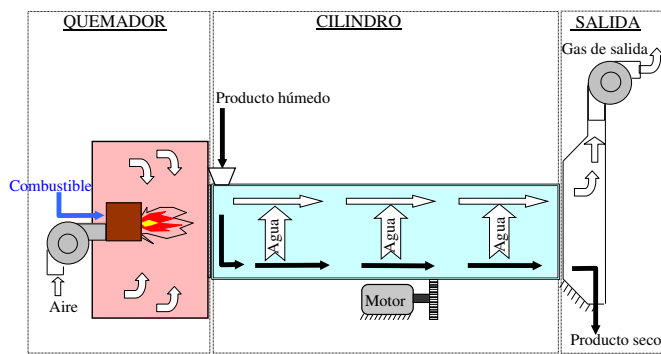


Figura 1. Esquema de un secadero de sólidos en isocorriente.

Zona de combustión: tiene como fin generar el calor suficiente para elevar la temperatura de la corriente de gas que se usará en el proceso.

La temperatura elevada se consigue quemando combustible en una cámara de combustión. Existen distintos tipos de cámaras en función del combustible utilizado, una de las más extendidas es la que usa combustible en estado gaseoso (gas natural u otro), éstas reciben el nombre de quemadores.

Los quemadores presentan ciertas ventajas, entre las que se pueden citar:

- la posibilidad de realizar un control preciso de la temperatura y flujos generados al disponer de electroválvulas para dosificar el gas aportado.
- presentan respuestas rápidas, no sólo en las operaciones de funcionamiento, sino también en las maniobras de arranque y parada.
- ocupan poco espacio.

Cilindro: en esta zona circula el material húmedo así como el gas caliente procedente de la zona de combustión. En el cilindro es donde se produce el proceso de secado. El material húmedo se introduce por el extremo del mismo y avanza por él debido a la rotación, saliendo seco por el otro extremo. Además, este elemento es el responsable de mover y voltear el material dentro de la corriente gaseosa facilitando el contacto sólido-gas, lo que permite un proceso de evaporación más eficiente.

El cilindro hueco tiene un diámetro que puede estar comprendido entre 0.3 y 3 metros y una longitud que varía entre 4 y 10 veces su diámetro, está apoyado sobre unos rodamientos y, en algunos casos, presenta una pequeña inclinación respecto a la horizontal para facilitar el movimiento del material a través del mismo (figura 2). En la cabeza está dispuesta la alimentación del producto húmedo mediante tolvas y elementos de transporte apropiados. El cilindro gira sobre su eje con una velocidad angular en torno a las 6 rpm, para lo que se equipa con un motor de una potencia en torno a los 100 kW. En la parte interna dispone de una serie de palas o aletas soldadas que favorecen la elevación y volteo del material, lo que permite un mejor contacto entre el sólido y la corriente gaseosa (figura 3). Las aletas también suelen tener cierta inclinación con respecto al eje del cilindro, facilitando el desplazamiento del material a lo largo del mismo.

En la instalación descrita se trabaja en *isocorriente*, es decir, que el gas circula en el mismo sentido que el material húmedo. Esta disposición es necesaria con materiales que no puedan estar expuestos a alta temperatura cuando la humedad es baja.



Figura 2. Detalle de un cilindro industrial.

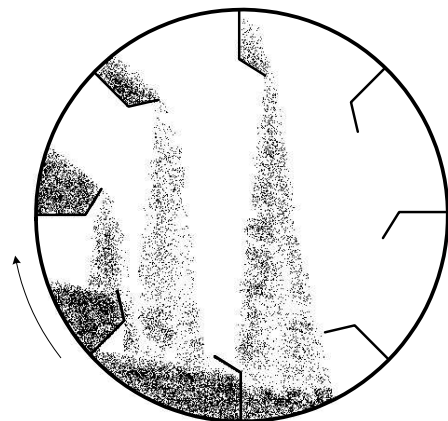


Figura 3. Sección transversal: disposición de las aletas internas

Zona de salida: en esta zona es donde se recoge el sólido seco por una parte, y por otra se expulsa el gas húmedo. A la salida del cilindro el material sólido se puede recoger en una cinta transportadora y los gases pasan a unos ciclones que eliminan el polvo que pudieran llevar en suspensión. Por último, en la chimenea de salida existe un ventilador que es el principal responsable de generar la corriente de gas que atraviesa el cilindro.

3. MODELADO MEDIANTE ECUACIONES DIFERENCIALES

El estudio de la desecación de un sólido se enfoca desde dos líneas distintas: una basada en los mecanismos internos de la circulación del líquido dentro del sólido, y otra basada en el examen de las condiciones externas.

El análisis de los mecanismos internos resulta muy complejo ya que hay que tratar con fenómenos de difusión, circulación por efecto capilar, circulación producida por gradientes de

presión y concentración, circulación causada por la gravedad, circulación causada por vaporizaciones y condensaciones, etc. Para todos estos mecanismos existen teorías desarrolladas, pero son difíciles de manejar en el terreno práctico. Debido a estas dificultades prácticas, el diseño de secaderos industriales se aborda con el examen de las condiciones externas.

El fenómeno de secado se describe por curvas que representan la humedad del sólido en función del tiempo para unas condiciones externas fijadas (Liptak, B.G., 1999).

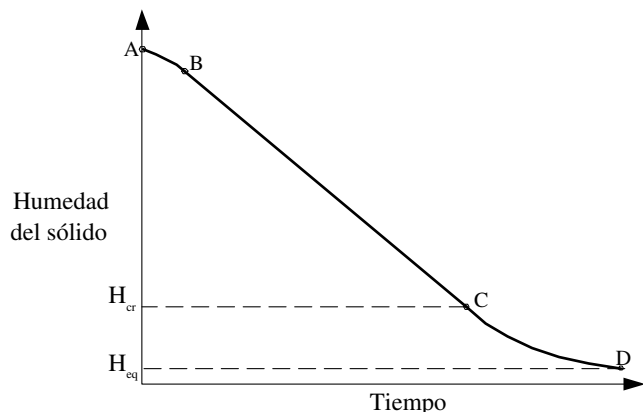


Figura 4. Humedad en función del tiempo.

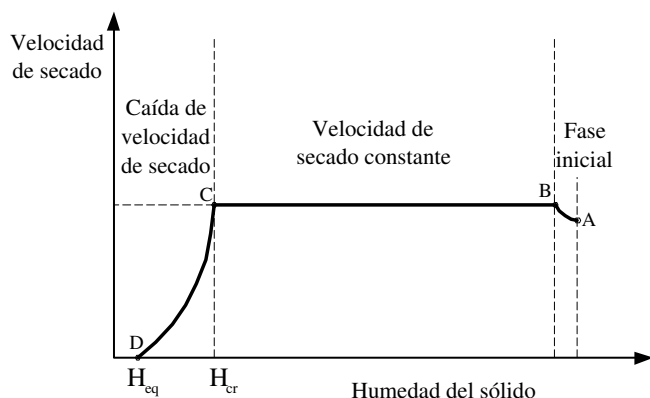


Figura 5. Velocidad de secado en función de la humedad.

Experimentalmente estas curvas muestran que el proceso de secado no es uniforme. Las figuras 4 y 5 representan un caso general de un sólido en proceso de secado. En una primera fase o periodo de calentamiento (curva A-B) la velocidad de evaporación se incrementa si la temperatura de la superficie del sólido es menor que la temperatura de equilibrio que se alcanza en la siguiente fase (curva B-C). Este periodo suele ser corto comparado con el del resto del proceso. Sigue a esta fase otra donde la velocidad de evaporación es constante (curva B-C), caracterizada por la evaporación del agua libre en la superficie del sólido. Por tanto, la velocidad depende más de factores externos que internos del sólido. En esta fase se mantiene prácticamente constante la temperatura de la superficie del sólido y ésta se corresponde con la temperatura húmeda. Por último, hay una fase de caída de la velocidad de evaporación a partir del punto C (contenido crítico de humedad) hasta el punto D (contenido de humedad de equilibrio del sólido). En esta última fase dominan los mecanismos internos de transporte en el sólido.

Una de las vías para obtener un modelo dinámico de secaderos rotatorios es el planteamiento de las ecuaciones diferenciales que gobiernan los procesos físicos dominantes. La ventaja fundamental de disponer de este tipo de modelos es que se pueden adaptar fácilmente a distintos secaderos rotatorios sin más que ajustar los parámetros correspondientes. Sin embargo, hay que decir que es muy difícil conocer de forma exacta algunos de los parámetros que entran en juego en las ecuaciones, debiéndose estimar u obtener éstos mediante correlaciones.

3.1 Perspectiva histórica

Existen varios trabajos de investigación que tratan sobre los mecanismos que intervienen en el proceso de secado de un sólido. En esta sección se tratará de enumerar solamente aquellos que se han desarrollado sobre secaderos rotatorios con el fin de obtener un modelo matemático.

Los modelos matemáticos se pueden clasificar en dos tipos: el primero se basa en un modelo *estático* que determina perfiles de humedad y temperatura para el sólido y gas a lo largo del cilindro y en régimen permanente; el segundo se corresponde con un modelo *dinámico* basado en ecuaciones diferenciales con parámetros distribuidos, que permite obtener la evolución de la humedad y temperatura cuando cambian las condiciones.

Los primeros trabajos en los que se obtiene un modelo matemático de un secadero rotatorio corresponden a (Myklestad, 1963b), que desarrolla un modelo estático de un secadero a contracorriente, donde aplica las siguientes hipótesis:

- Se trabaja con un coeficiente volumétrico global de transferencia de calor.
- La temperatura del sólido permanece constante en la zona de velocidad de secado constante y es lineal con la humedad en la zona de caída de velocidad de secado.
- Existe una relación lineal entre la temperatura del aire y el contenido de humedad del sólido.

Posteriormente, en (Sharples, K., Glikin, P.G., Warne, R., 1964) se plantea un modelo con cuatro ecuaciones diferenciales que describen los procesos de transferencia de masa y energía. Este modelo fue validado para secaderos de fertilizantes que trabajaban tanto en isocorriente como en contracorriente.

En la tesis doctoral (Thorpe, G.R., 1972) se divide el cilindro del secadero en etapas y se aplican las ecuaciones de balance de masas y energía a cada una de estas etapas. En otro trabajo (Deich, V.G., Stalskii, V.V., 1975) los investigadores desarrollan un modelo dinámico con las hipótesis siguientes:

- Se trabaja con parámetros distribuidos para el sólido y el gas.
- El calor específico del sólido es constante.
- Los coeficientes de transferencia de masa y energía son constantes.
- Las velocidades del sólido y del gas son constantes a lo largo del cilindro del secadero.
- Los fenómenos de conducción, difusión y radiación son despreciables.

El trabajo presentado en (Reay, D., 1979) contiene un estudio general que incluye un modelo para el sólido y otro para la instalación de forma independiente. En el modelo de comportamiento del sólido obtiene la velocidad de secado como función de la humedad en el sólido y de la temperatura y humedad del aire seco. En este estudio se pone de manifiesto que una

de las principales dificultades a la hora de plantear un modelo fiable está en la determinación del coeficiente volumétrico de transmisión de calor y del tiempo de paso del sólido en el cilindro.

Por otra parte, en (Brasil, G.C., Seckler M.M., 1988) se presentan trabajos sobre el secado de fertilizantes, donde muestran la influencia del diámetro de las partículas a secar y proponen un modelo donde la velocidad de evaporación es función de este parámetro.

En (Douglas P.L., Kwade, A. Lee, P.L., Mallick, S.K., 1992) se propone un modelo en el que se divide el cilindro en varias secciones, asumiendo un juego de parámetros fijos para cada sección, a las que imponen ecuaciones de equilibrio. Este modelo lo aplican a un secadero de azúcar.

En el trabajo (Duchesne, C., Thibault, J., Bazin, C., 1997) se presenta un simulador de secaderos rotatorios con cuatro submodelos: modelo de combustión, modelo de transporte, modelo del gas y modelo del sólido. En este simulador se muestra que para controlar la humedad del sólido en la salida la principal variable a manipular es el flujo de combustible.

En (Savaresi *et al.*, 2001) se propone el modelado y control de un secadero rotatorio de azúcar.

Más recientemente (Sheehan *et al.*, 2005), (Britton *et al.*, 2006), presentan modelos de parámetros distribuidos aplicados a secaderos en contracorriente de azúcar, mientras que en (Lobato *et al.*, 2008) se hace uso de técnicas de evolución diferencial para estimar los parámetros de modelos similares.

3.2 Planteamiento a seguir para el modelado

El modelado mediante ecuaciones diferenciales que se ha desarrollado en este artículo se apoya en parte en los trabajos de investigación mencionados en el punto anterior. Dichos trabajos se han completado con nuevas aportaciones referentes a la velocidad de evaporación del sólido. Esta variable va a tener un papel muy importante en la evolución de los transitorios, por lo que es fundamental para la obtención de modelos que puedan ser usados para control.

En el modelado de este tipo de instalaciones, pueden existir diferencias básicas que pueden afectar al planteamiento de las ecuaciones. Para distintas instalaciones de secaderos rotatorios estas diferencias se centrarán en:

- El tipo de cámara de combustión que genera el flujo de aire caliente, que vendrá determinado por el tipo de combustible que utilice (sólido, líquido o gas).
- El sólido a secar, que tendrá influencia en tres puntos importantes como son:
 - La determinación de *velocidades de evaporación*.
 - El *tiempo de paso*, que viene influido por el movimiento del sólido dentro del cilindro.
 - La determinación del *coeficiente volumétrico de transmisión de calor*.

4. MODELADO DE UNA INSTALACIÓN INDUSTRIAL

El interés de realizar un modelado paramétrico de una planta de secado es doble: por un lado con el modelo será posible realizar simulaciones de los distintos puntos de trabajo alcanzables por la planta, lo que permitirá realizar estudios para determinar qué puntos de trabajo son los más ventajosos desde el punto

de vista económico. Por otro lado, disponer de un modelo que contemple las dinámicas dominantes permitirá la obtención de modelos simplificados para distintos puntos de trabajo que pueden ser utilizados para el diseño de controladores para la planta.

Según la división de la instalación de la planta de secado en tres zonas, habría que realizar un modelado para cada una de ellas. Realmente se puede prescindir del modelado de la zona de salida donde está dispuesto el ventilador que fuerza el flujo de gas a través del cilindro, considerando este flujo como condición impuesta a la entrada de la zona de combustión. Por tanto, se reduce el planteamiento a la zona de combustión y al cilindro.

Otra cuestión importante a tener en cuenta es la respuesta dinámica que presenta cada una de las partes. Así, la respuesta que presentan las variables en la zona de combustión evoluciona de forma mucho más rápida que la respuesta de las variables involucradas en la zona del cilindro, donde se produce la evaporación. Por tanto, el error no será excesivamente importante si se considera dinámica instantánea para la evolución de las variables de la cámara de combustión.

4.1 Modelado de la combustión

Considerando como cámara de combustión un quemador de gas natural, para el modelado de esta zona se partirá de unas condiciones conocidas del aire a la entrada:

- *temperatura ambiente*
- *presión atmosférica*
- *humedad del ambiente*

y de unos flujos determinados:

- *flujo de combustible*
- *caudal de gas*

Normalmente, estas dos últimas variables son manipulables en la instalación mediante electroválvulas y el ventilador de tiro inducido respectivamente.

Se tendrán como incógnitas a la salida del quemador las siguientes variables:

- *flujo de gas*
- *humedad del gas*
- *temperatura del gas*

que servirán como condiciones de flujo de gas en la entrada del cilindro evaporador.

Por otra parte, en el modelo del quemador se tendrán en cuenta las siguientes hipótesis simplificadoras:

- La dinámica es instantánea.
- El calor específico del gas de salida es igual al calor específico del aire.
- El incremento en la humedad del gas a la salida es despreciable.
- No se producirá acumulación del gas en la cámara de combustión.
- Las pérdidas de calor a través de las paredes de la cámara de combustión son despreciables.

Teniendo en cuenta estas simplificaciones, el comportamiento de un quemador puede ser modelado mediante las siguientes

ecuaciones:

- *Conservación de la masa de gas:*

$$F_g = F_{g_a} + F_{comb} \quad (1)$$

- *Conservación de la energía:*

$$F_{g_a} \cdot C_{p_{g_a}} \cdot T_a + F_{comb} \cdot H_{p_n} \cdot \eta = C_{p_g} \cdot T \cdot F_g \quad (2)$$

- *Ecuación de los gases ideales:*

$$F_g = \frac{Q_g \cdot p_{m_g} \cdot P_{at}}{R \cdot (T + 273)} \quad (3)$$

- *Ecuación de la humedad de salida de los gases:*

$$Y = Y_a \quad (4)$$

La Tabla 1 muestra la notación empleada.

Tabla 1. Notación usada en el modelado de la combustión

Not.	Descripción	Unidades
C_{p_g}	Calor específico del gas de salida	$\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$
$C_{p_{g_a}}$	Calor específico del aire ambiente	$\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$
F_{g_a}	Flujo másico de aire seco a la entrada	$\frac{kg}{s}$
F_g	Flujo másico de gas seco a la salida	$\frac{kg}{s}$
F_{comb}	Flujo másico de combustible	$\frac{kg}{s}$
H_{p_n}	Poder calorífico del gas natural	$\frac{kJ}{kg}$
P_{at}	Presión atmosférica	Pa
p_{m_g}	Peso molecular de los gases de salida	$\frac{kg}{kmol}$
Q_g	Caudal de gas seco a la salida	$\frac{m^3}{s}$
R	Constante de los gases ideales	$\frac{J}{kmol \cdot ^\circ C}$
T_a	Temperatura ambiente	$^\circ C$
T	Temperatura de salida	$^\circ C$
Y_a	Humedad del ambiente	$\frac{kg_{vapor}}{kg_{aire,seco}}$
Y	Humedad de los gases de combustión	$\frac{kg_{vapor}}{kg_{gas,seco}}$
η	Rendimiento de la combustión	

4.2 Modelado de la evaporación (cilindro)

Antes de comenzar a describir las ecuaciones diferenciales que determinan el comportamiento dinámico de las distintas variables en el cilindro, conviene puntualizar algunos aspectos específicos de los procesos físicos que tienen lugar. En el proceso de secado intervienen, por un lado, el material sólido que porta cierta cantidad de agua que se pretende que disminuya, y por otro lado, el gas o aire que se presenta inicialmente una cantidad baja de vapor de agua. Al poner en contacto estos elementos en unas condiciones de presión y temperatura dadas, se llega a un nuevo estado de equilibrio donde parte del agua cambia de estado, pasando de estar mezclada con el sólido a formar parte del gas. Existe, por lo tanto, un flujo de agua de evaporación que dependerá para cada instante, del material sólido y del gas, de las humedades relativas, de la superficie de contacto, de la temperatura y de la presión.

En el planteamiento de las ecuaciones que rigen el proceso de secado continuo hay que tener en cuenta ciertas hipótesis que permitirán simplificar su estudio. Entre otras, se considerarán las siguientes:

- La transmisión de calor tiene lugar principalmente por conducción-convección y prevalecen las condiciones adia-

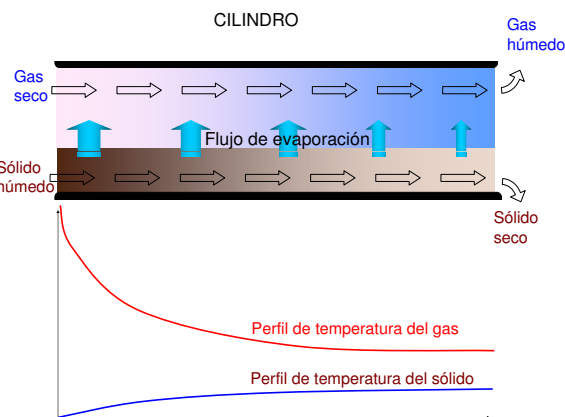


Figura 6. Esquema del cilindro con los Perfiles de temperatura de sólido y gas a lo largo del cilindro.

báticas, es decir, se despreciará la transmisión de energía con el exterior.

- El aire es tratado como gas ideal.
- La velocidad de evaporación depende de la temperatura, humedad, velocidad del gas y granulometría (esta dependencia viene determinada por resultados experimentales en laboratorio).
- Algunos parámetros importantes como el *tiempo de paso* (t_{paso}) y el *coeficiente volumétrico de transmisión de calor* (U_a) se estiman mediante correlaciones.

A lo largo del secadero existen fuertes gradientes tanto de concentraciones como de temperaturas (véase la figura 6), lo que obliga a trabajar con un modelo de parámetros distribuidos. Para la creación de un modelo se suele dividir el cilindro en un número finito de elementos volumétricos dispuestos en serie y se aplica a cada elemento las ecuaciones de conservación.

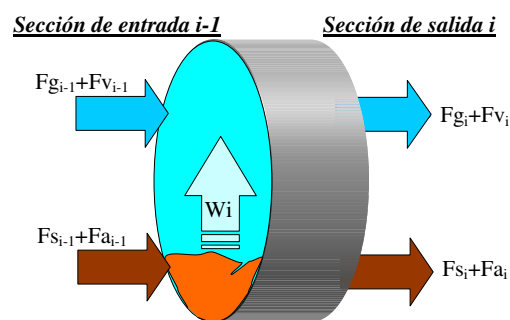


Figura 7. Elemento de volumen del cilindro.

Cada elemento de volumen estará limitado longitudinalmente por dos secciones llamadas *sección de entrada* (empleando el subíndice $i - 1$) y *sección de salida* (con el subíndice i), (véase figura 7). Supuestas conocidas las condiciones de alimentación del secadero, el resto de elementos de volumen se van resolviendo en serie, ya que las variables correspondientes a la sección de entrada ($i - 1$) serán conocidas y, por lo tanto, a partir de las ecuaciones se obtendrán las de salida (i).

La Tabla 2 muestra la notación empleada en este modelado.

Tabla 2. Notación usada en el modelado de la evaporación

Not.	Descripción	Unidades
Cp_a	Calor específico del agua	$\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$
Cp_g	Calor específico a presión cte. del gas seco	$\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$
Cp_v	Calor específico a presión cte. del vapor de agua	$\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$
Cp_s	Calor específico del sólido	$\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$
Fa	Flujo de agua contenida en el sólido que atraviesa la sección	$\frac{kg}{s}$
Fg	Flujo de gas seco que atraviesa la sección	$\frac{kg}{s}$
Fs	Flujo de sólido seco que atraviesa la sección	$\frac{kg}{s}$
Fv	Flujo de vapor contenido en el gas que atraviesa la sección	$\frac{kg}{s}$
H	Humedad del sólido en base húmeda	$\frac{kg_{agua}}{kg_{sol.hum}}$
Ma	Masa de agua contenida en el sólido en el elemento de volumen	kg
Mg	Masa de gas seco en el elemento de volumen	kg
Ms	Masa de sólido seco contenida en el elemento de volumen	kg
Mv	Masa de vapor contenida en el gas en el elemento de volumen	kg
P	Presión del gas	Pa
Tg	Temperatura de la corriente gaseosa	$^\circ C$
Ts	Temperatura del sólido	$^\circ C$
U_a	Coefficiente volumétrico de transmisión de calor	$\frac{kW}{m^3 \cdot ^\circ C}$
V	Volumen de cada elemento de volumen	m^3
v_g	Velocidad del gas seco	$\frac{m}{s}$
W	Flujo de agua evaporada	$\frac{kg}{s}$
X	Humedad del sólido en base seca	$\frac{kg_{agua}}{kg_{sol.seco}}$
Y	Humedad del gas en base seca	$\frac{kg_{vapor}}{kg_{gas.seco}}$
λ	Calor latente de vaporización a $0^\circ C$	$\frac{kJ}{kg}$
ρ_s	Densidad del sólido seco	$\frac{kg}{m^3}$

Las ecuaciones que describen el modelo de evaporación son las siguientes:

- *Conservación del sólido seco:*

$$\frac{d(Ms_i)}{dt} = Fs_{i-1} - Fs_i \quad (5)$$

- *Conservación del agua:*

$$\frac{d(Ma_i)}{dt} = Fa_{i-1} - Fa_i - W_i \quad (6)$$

- *Conservación del gas seco:*

$$\frac{d(Mg_i)}{dt} = Fg_{i-1} - Fg_i \quad (7)$$

- *Conservación del vapor de agua:*

$$\frac{d(Mv_i)}{dt} = Fv_{i-1} - Fv_i + W_i \quad (8)$$

- *Conservación de la energía en la fase sólida:*

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [(Cp_s \cdot Ms_i + Cp_a \cdot Ma_i) \cdot Ts_i] = & \\ (Fs_{i-1} \cdot Cp_s + Fa_{i-1} \cdot Cp_a) \cdot Ts_{i-1} - & \\ - (Fs_i \cdot Cp_s + Fa_i \cdot Cp_a) \cdot Ts_i - & \\ - W_i \cdot (Cp_a \cdot Ts_i + \lambda) + U_a \cdot V \cdot (Tg_i - Ts_i) & \end{aligned} \quad (9)$$

- *Ecuación de conservación de energía de la fase gaseosa:*

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [(Cp_v \cdot Mv_i + Cp_g \cdot Mg_i) \cdot Tg_i] = & \\ (Fg_{i-1} \cdot Cp_g + Fv_{i-1} \cdot Cp_v) \cdot Tg_{i-1} + & \\ + (Fg_i \cdot Cp_g + Fv_i \cdot Cp_v) \cdot Tg_i + & \\ + W_i \cdot (Cp_a \cdot Ts_i + \lambda) - U_a \cdot V \cdot (Tg_i - Ts_i) & \end{aligned} \quad (10)$$

- *Ecuaciones de humedad del sólido y del vapor en base seca en función de los flujos:*

$$X_i = \frac{Fa_i}{Fs_i} \quad (11)$$

$$Y_i = \frac{Fv_i}{Fg_i} \quad (12)$$

- *Ecuaciones de humedad del sólido y del vapor en base seca en función de las masas:*

$$X_i = \frac{Ma_i}{Ms_i} \quad (13)$$

$$Y_i = \frac{Mv_i}{Mg_i} \quad (14)$$

- *Relación entre la masa de gas seco contenida en un elemento de volumen, su temperatura y la masa de sólido:*

$$Mg_i = \left(V - \frac{Ms_i}{\rho_s} \right) \left(\frac{pm_g \cdot pm_a}{pm_g \cdot Y_i + pm_a} \right) \frac{P}{R(Tg_i + 273)} \quad (15)$$

- *Relación entre la masa del sólido y el flujo de sólido:*

$$Ms_i = t_{paso} \cdot Fs_i \quad (16)$$

donde t_{paso} es el tiempo de paso, que será determinado para un elemento de volumen (la estimación de este parámetro se explica más adelante).

Sección de entrada i-1 Elemento de volumen i Sección de salida i

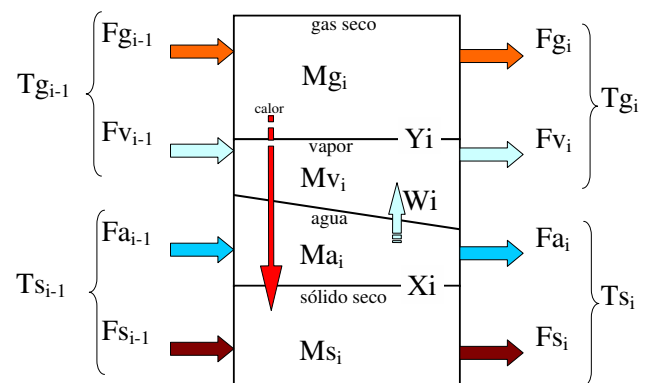


Figura 8. Esquema de variables implicadas.

Se han empleado un conjunto de 12 ecuaciones para las 13 incógnitas (7 del elemento de volumen i , más 6 de la sección de salida i , como se observa en la figura 8). Por lo tanto, es necesaria una ecuación adicional para resolver el sistema planteado. Esta ecuación es la que proporciona el flujo de agua evaporada en el elemento de volumen X_i , que puede expresarse como:

■ Ecuación del flujo de evaporación

$$W_i = v_{evap} \cdot M s_i \quad (17)$$

donde v_{evap} se conoce como la *velocidad de evaporación del sólido*. En general, v_{evap} se podrá expresar en unidades de

$$\frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido seco} \cdot \text{segundo}}$$

y, básicamente, depende de cuatro variables: por una parte, la *velocidad y temperatura del gas*, y por otra, la *humedad y geometría del sólido* (Arjona, R., 1997), (Arjona, R., García, A., Ollero, P., 1999)). Así, se tiene que:

$$v_{evap} = f(v_g, T, H, d)$$

donde la geometría del sólido viene caracterizada por d (diámetro).

El éxito del modelo depende en gran medida de una buena estimación de v_{evap} del sólido a secar. Sin embargo, en muchos casos no se dispone de una expresión de v_{evap} para el sólido considerado. Si esto sucede, entonces son necesarios ensayos sobre el sólido que permitan obtener $v_{evap} = f(v_g, T, H, d)$, al menos para las condiciones en las que el sólido se encontrará durante el proceso.

En la sección 6 se muestra con más detalle cómo se ha obtenido la v_{evap} para el caso concreto de la arena fina usada en la planta experimental.

Ecuaciones adicionales

Al introducir las variables velocidad del gas y humedad en base húmeda en el cálculo de los flujos de evaporación es necesario presentar nuevas relaciones. Así, para la sección i :

$$H_i = \frac{X_i}{1 + X_i} \quad (18)$$

$$v_{g_i} = \frac{F g_i}{\rho_i \cdot \text{area}_i} \quad (19)$$

donde ρ_i es la densidad del gas seco en la sección i . Esta densidad puede hallarse de igual modo que la del gas húmedo, resultando:

$$\rho_i = \frac{p m_g \cdot P}{R(T g_i + 273)} \quad (20)$$

Estimación del tiempo de paso

El tiempo de paso se define como la carga (o peso) de sólido dentro del cilindro dividida por el flujo de producto que lo atraviesa.

Hay varios factores que influyen en este tiempo. Así, dependerá de las características del cilindro como su longitud, diámetro, inclinación, forma y disposición de las aletas interiores. También, de las condiciones de trabajo, como velocidad de rotación del cilindro y velocidad del gas de secado. Y por último, de las características del sólido que determinan su movilidad, como pueden ser su granulometría, viscosidad, adherencia, etc. Se desprende de esto que no es fácil obtener una relación analítica del tiempo de paso, por lo que hay que utilizar correlaciones que permitan estimar un valor, al menos en la zona de trabajo de interés. Una de las más citadas (Perry, R.H., Green, D.W., 1997) es la de Friedman y Marshall (Friedman, S.J., Marshall, W.R. Jr., 1949a) (Friedman, S.J., Marshall,

W.R. Jr., 1949b):

$$t_{paso} = \frac{0.23}{S \cdot N^{0.5}} \cdot \left[\frac{L}{D} \right] - 9.84 \cdot D_p^{-0.5} \cdot L \cdot \left[\frac{G}{F} \right]$$

donde el *tiempo de paso* queda expresado en minutos; D_p es el promedio del tamaño de la partícula del sólido, en μm ; L es la longitud del cilindro en metros; D es el diámetro del cilindro en metros; S es la pendiente del cilindro; N es la velocidad, en rpm ; G es el flujo de gas, y F flujo de material, con G y F expresadas en las mismas unidades.

Coefficiente volumétrico de transmisión de calor

Otro parámetro que tiene gran influencia en la evolución de las variables de un secadero, y que es difícil de determinar de forma exacta, es el coeficiente volumétrico de transmisión de calor por unidad de volumen U_a . Han sido varios los investigadores que han estudiado este punto, entre los que cabe citar a (Friedman, S.J., Marshall, W.R. Jr., 1949a), (Friedman, S.J., Marshall, W.R. Jr., 1949b), (McCormick, P.Y., 1962), (Schofield, F.R., Glikin, P. G., 1962) y (Myklestad, 1963a). La mayoría de ellos llegan a conclusiones similares, que se pueden resumir en que el coeficiente U_a viene determinado por el flujo de sólido, el flujo de aire y las propiedades físicas del sólido tratado en los secaderos rotatorios. También proponen el uso de correlaciones que permitan calcular este coeficiente (al menos de forma aproximada), siendo la más general la siguiente:

$$U_a = \frac{K \cdot G^n}{D}$$

con U_a expresado en $(\frac{\text{kJ}}{\text{h} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{C} \cdot \text{m}^3})$, siendo G el flujo de gas expresado en $(\frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2})$; D el diámetro del cilindro expresado en (m) y K y n constantes empíricas que hay que determinar en cada caso.

5. APLICACIÓN A UNA PLANTA EXPERIMENTAL DE SECADO DE ARENA

En esta sección se muestra la aplicación del modelado propuesto sobre una planta experimental de secado de sólidos, para la que se ha utilizado arena fina. Se expondrán los parámetros más significativos necesarios para implementar las ecuaciones y en la sección 6 se detallarán los ensayos a los se somete la arena para determinar su *velocidad de evaporación*.

5.1 Modelo del quemador de la planta experimental

La figura 9 muestra el quemador de gas de la planta que utiliza como combustible gas natural, y sobre el que se actúa en el F_{comb} mediante una electroválvula. El modelo del quemador se plantea como un modelo de parámetros concentrados mediante las cuatro ecuaciones dadas en la sección 4.1.

En la Tabla 3 se muestran los parámetros usados en el modelo del quemador de la planta experimental.



Figura 9. Detalle del quemador.

Tabla 3. Parámetros empleados en el modelo del quemador

Parámetro	Valor	Unidades
Cp_g	1.006	$\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$
Cp_{ga}	1.006	$\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$
Hp_n	39083	$\frac{kJ}{kg}$
P_{at}	100000	Pa
pm_g	29	$\frac{kg}{kmol}$
R	8314	$\frac{J}{mol \cdot ^\circ C}$
η	0.95	

Para las variables implicadas en el modelo, cada planta de secado presentará un rango de valores alcanzables en función de sus dimensiones, limitaciones de los actuadores, ubicación, etc. En la Tabla 4 se muestran estos rangos de la planta de secado de arena.

Tabla 4. Rangos de las variables del modelo del quemador

Variable	Rango	Unidades
Fg_a	[1.0, 2.0]	$\frac{kg}{s}$
Fg	[1.0, 2.0]	$\frac{kg}{s}$
F_{comb}	[0.0002, 0.010]	$\frac{kg}{s}$
Qg	[0.8, 1.5]	$\frac{m^3}{s}$
T_a	[5, 40]	$^\circ C$
T	[50, 250]	$^\circ C$
Y_a	[0.005, 0.01]	$\frac{kg_{vapor}}{kg_{aire, seco}}$
Y	[0.005, 0.01]	$\frac{kg_{vapor}}{kg_{gas, seco}}$

Así pues, a la hora de realizar una simulación para el quemador, se suelen fijar, por un lado, las condiciones del ambiente como la temperatura del aire y su humedad, y por otro, las condiciones de la instalación como es el caudal de gas. Se podrá utilizar como variable de actuación el flujo de combustible. La evolución de la simulación irá generando los valores de las variables de salida *flujo de gas seco*, *humedad del gas* y *temperatura de gas* (que se utilizarán como condiciones de entrada en la primera sección del cilindro evaporador).

5.2 Modelo del cilindro de la planta experimental

El modelo de la evaporación que se produce en el cilindro se plantea como un modelo de parámetros distribuidos de forma similar a como se muestra en la sección 4.2.

La figura 10 muestra el aspecto externo del cilindro de la planta experimental.



Figura 10. Detalle del cilindro.

El cilindro tiene una longitud L de 4 metros, con un diámetro D de 0,8 metros. En el modelo se divide el espacio total del cilindro en 10 elementos de volumen. En la Tabla 5 se muestran los parámetros usados en el modelo.

Tabla 5. Parámetros empleados en el modelo de evaporación

Parámetro	Valor	Unidades
Cp_a	4.1868	$\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$
Cp_g	1.006	$\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$
Cp_v	1.890	$\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$
Cp_s	1.5	$\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$

El rango de cada variable se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Rangos de las variables del modelo de evaporación

Variable	Rango	Unidades
Fa	[0, 0.06]	$\frac{kg}{s}$
Fg	[0.5, 2.0]	$\frac{kg}{s}$
Fs	[0, 0.1]	$\frac{kg}{s}$
Fv	[0.002, 0.4]	$\frac{kg}{s}$
H	[0.003, 0.06]	$\frac{kg_{agua}}{kg_{sol, hum}}$
Ma	[0.05, 1.5]	kg
Mg	[0.17, 0.26]	kg
Ms	[15, 25]	kg
Mv	[0.0008, 0.0026]	kg
Tg	[50, 250]	$^\circ C$
Ts	[5, 60]	$^\circ C$
U_a	[0.19, 0.27]	$\frac{kW}{m^2 \cdot ^\circ C}$
v_g	[2, 3]	$\frac{m}{s}$
W	[0, 0.0038]	$\frac{kg}{s}$
X	[0.003, 0.06]	$\frac{kg_{agua}}{kg_{sol, seco}}$
Y	[0.005, 0.01]	$\frac{kg_{vapor}}{kg_{gas, seco}}$

A continuación se muestran las ecuaciones y correlaciones particulares de esta instalación y sólido.

- *Velocidad de evaporación:*

$$v_{evap} = \frac{(5,47 \cdot 10^{-6} \cdot H_i + 2,31 \cdot 10^{-7}) \cdot Tg_i - (2,14 \cdot 10^{-5} \cdot H_i + 2,55 \cdot 10^{-6}) + [(1,49 \cdot 10^{-6} \cdot H_i + 6,37 \cdot 10^{-8}) \cdot Tg_i - (6,97 \cdot 10^{-5} \cdot H_i + 4,47 \cdot 10^{-6})] \sqrt{(vg - 2)}}{\sqrt{(vg - 2)}} \quad (21)$$

El desarrollo completo que determina esta expresión se ha incluido en la sección 6.

- **Tiempo de paso para un elemento de volumen:**

$$t_{paso} = \frac{0,23}{S \cdot N^{0,9}} \cdot \left[\frac{L}{D} \right] - 9,84 \cdot D_p^{-0,5} \cdot L \cdot \left[\frac{F_g}{F_s} \right]$$

donde el t_{paso} expresado en minutos;

$$D_p = 500 \mu m; \quad L = 4/10 = 0.4 m; \quad D = 0.8 m; \\ S = 0.005; \quad N = 6 rpm.$$

- **Coefficiente volumétrico de transmisión de calor:**

$$U_a = \frac{17,79 \cdot G^{0,46}}{D}$$

con U_a expresado en $(\frac{kJ}{h \cdot ^\circ C \cdot m^3})$.

Para la arena, en las condiciones dadas se obtiene $U_a \approx 0,2 (\frac{kJ}{h \cdot ^\circ C \cdot m^3})$

6. ENSAYOS PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE EVAPORACIÓN DE LA ARENA

6.1 Consideraciones previas

En el modelo de secadero utilizado es necesario tener una estimación de la velocidad de secado del material a tratar, que en el caso de la planta experimental es arena fina. Para ello se han tenido que realizar varios ensayos en un *túnel de secado*.

A partir de los datos experimentales obtenidos se ha llegado a determinar una ecuación de la velocidad de secado en función de la temperatura y velocidad del gas y de la humedad de la arena.

En general, el objetivo es la obtención de una expresión, para el sólido tratado, de la velocidad de evaporación $v_{evap} = f(v_g, T, H, d)$. En el caso más simple en el que se disponga de un sólido bien disgregado y tamaño uniforme, el valor de d es único. Pero cuando el sólido a secar presenta partículas o agrupaciones de partículas con tamaños muy dispares hay que realizar un estudio de su distribución granulométrica, ya que ésta influye en el flujo de evaporación. Para ello, se suelen hacer algunas aproximaciones, así, se supone que el sólido está formado por esferas cuyo diámetro se aproxima por una distribución gaussiana. Otra aproximación que se hace es considerar que la distribución granulométrica no varía a lo largo del proceso de secado, aunque ciertamente, esta distribución es variable ya que en la entrada se tendrán esferas de tamaño mayor que, debido al volteo del cilindro, acaban disgregándose en esferas más pequeñas, favoreciendo de este modo el proceso de evaporación.

6.2 Túnel de Secado

Básicamente, el túnel de secado es un equipo de laboratorio que permite realizar ensayos de secado de sólido imponiendo un flujo desarrollado similar en velocidad y temperatura al que se da en el interior de la instalación de secado y que permite

hacer medidas del peso de las muestras del sólido en tiempo real.

6.3 Pruebas de secado

Los ensayos deben permitir la obtención de datos de evaporación en el sólido en unas condiciones cercanas a las que existen dentro del secadero rotativo. Por tanto, la bandeja que contiene la muestra para los ensayos se ha diseñado de manera que la superficie de transmisión de calor sea suficientemente grande para que se produzca un buen contacto sólido-gas. En el caso de la arena, los ensayos se realizan a temperaturas entre 50°C y 250°C, y con velocidad del aire entre 2 y 3 m/s.

Las muestras serán tales que la superficie de transmisión sea la misma para todos los ensayos, por lo que se introducirá aproximadamente la misma cantidad de arena.

La gráfica de la figura 11 muestra los resultados obtenidos para una velocidad del aire de 2 m/s y unas temperaturas de 50, 100, 150, 200 y 250°C.

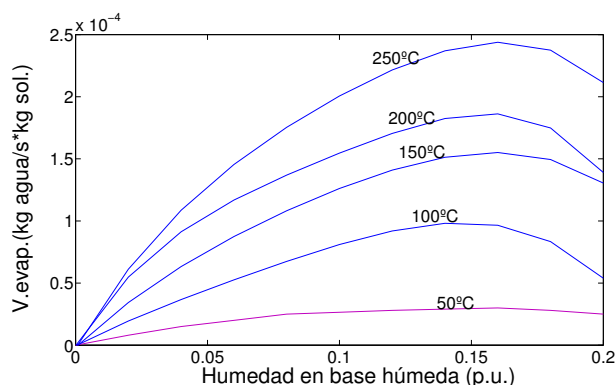


Figura 11. Velocidad de secado en función de la humedad de sólido.

También se puede representar la velocidad de secado en función de la temperatura para los valores de humedad de 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 y 16 % en bh (base húmeda) (figura 12).

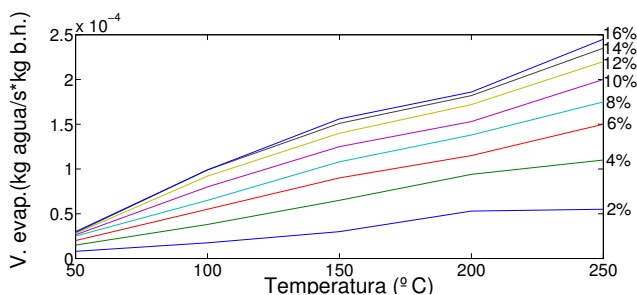


Figura 12. Velocidad de secado en función de la temperatura de gas.

De los datos mostrados se puede obtener de forma aproximada rectas que den la velocidad de secado en función de la temperatura para las distintas humedades:

$$\begin{aligned}
H = 0,02 &\rightarrow v_{evap} = 2,3552 \cdot 10^{-7} \cdot T - 5,2147 \cdot 10^{-7} \\
H = 0,04 &\rightarrow v_{evap} = 4,4880 \cdot 10^{-7} \cdot T - 4,2746 \cdot 10^{-6} \\
H = 0,06 &\rightarrow v_{evap} = 6,1302 \cdot 10^{-7} \cdot T - 5,9883 \cdot 10^{-6} \\
H = 0,08 &\rightarrow v_{evap} = 7,3639 \cdot 10^{-7} \cdot T - 5,8253 \cdot 10^{-6} \\
H = 0,10 &\rightarrow v_{evap} = 8,3209 \cdot 10^{-7} \cdot T - 4,6103 \cdot 10^{-6} \\
H = 0,12 &\rightarrow v_{evap} = 9,1194 \cdot 10^{-7} \cdot T - 3,5562 \cdot 10^{-6} \\
H = 0,14 &\rightarrow v_{evap} = 9,8004 \cdot 10^{-7} \cdot T - 3,9896 \cdot 10^{-6} \\
H = 0,16 &\rightarrow v_{evap} = 1,0265 \cdot 10^{-6} \cdot T - 7,0768 \cdot 10^{-6}
\end{aligned}$$

Se observa que la pendiente de las rectas sigue un comportamiento lineal con la humedad, con un coeficiente de correlación de $r = 0.99$, ajustándose a la recta:

$$5,4675 \cdot 10^{-6} \cdot H + 2,3096 \cdot 10^{-7}$$

El valor de la velocidad de secado correspondiente a 0°C es también aproximadamente lineal con la humedad con un coeficiente de correlación de $r = 0.6$, para:

$$-2,1398 \cdot 10^{-5} \cdot H - 2,5545 \cdot 10^{-6}$$

Con lo que se obtiene una expresión de la velocidad de secado para 2 m/s en función de la humedad y temperatura:

$$v_{evap} = (5,4675 \cdot 10^{-6} \cdot H + 2,3096 \cdot 10^{-7}) \cdot T - (2,1398 \cdot 10^{-5} \cdot H + 2,5545 \cdot 10^{-6})$$

Este mismo proceso se puede realizar para una velocidad de aire de 3 m/s . Para el rango de trabajo, la diferencia de velocidad de secado entre las curvas a 2 y 3 m/s es lineal con la humedad, aunque las curvas son casi paralelas, y crecientes con la temperatura. Como sólo se dispone de experiencias para 2 y 3 m/s , se puede suponer que la velocidad de evaporación varía con la raíz cuadrada de la diferencia de velocidades de aire. Para 3 m/s se tiene que la velocidad de evaporación es:

$$v_{evap} = (6,9567 \cdot 10^{-6} \cdot H + 2,9471 \cdot 10^{-7}) \cdot T - (9,1087 \cdot 10^{-5} \cdot H + 1,9254 \cdot 10^{-6})$$

Se puede ajustar la ecuación general tal que garantice las dependencias obtenidas para 2 y 3 m/s y siga la relación querida:

$$v_{evap} = (5,4675 \cdot 10^{-6} \cdot H + 2,3096 \cdot 10^{-7}) \cdot T - (2,1398 \cdot 10^{-5} \cdot H + 2,5545 \cdot 10^{-6}) + [(1,4893 \cdot 10^{-6} \cdot H + 6,3748 \cdot 10^{-8}) \cdot T - (6,9689 \cdot 10^{-5} \cdot H + 4,4749 \cdot 10^{-6})] \cdot \sqrt{(v_g - 2)}$$

Esta velocidad de evaporación experimental viene expresada en unidades de:

$$\frac{\text{kg agua}}{\text{kg solido seco} \cdot \text{segundo}}$$

Por lo que será necesario conocer la cantidad de sólido seco contenida en cada sección del cilindro y por tanto la densidad de la arena.

7. VALIDACIÓN DEL MODELO

Para validar el modelo completo se han comparado los resultados de simulación con los valores experimentales medidos en la instalación.

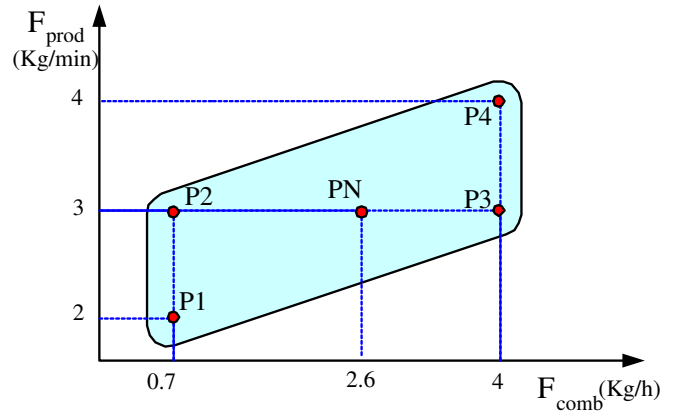


Figura 13. Zona de trabajo de las variables de entrada.

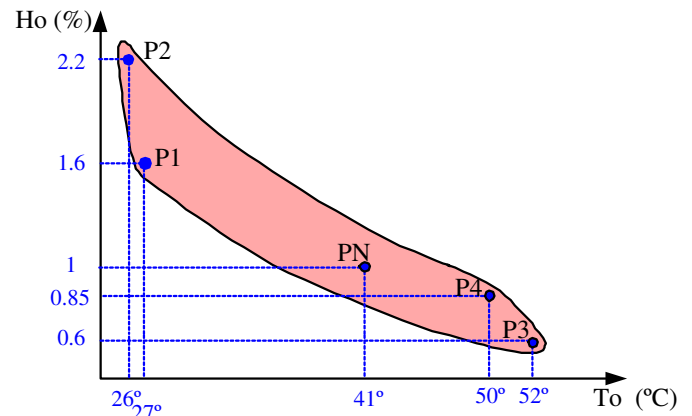


Figura 14. Zona de trabajo de las variables de salida.

En la figura 13 se muestra la zona de trabajo de las variables de control admisibles para esta instalación. Como puede observarse, el flujo de producto admisible puede variar entre 2 y 4 kg/min , mientras que el flujo de combustible puede variar entre 0.7 y 4 kg/h , aproximadamente. Por otra parte, en la figura 14 se muestra la zona de trabajo de las salidas para valores estándares de las perturbaciones (humedad y temperatura del producto de entrada, temperatura ambiente, etc.). En esta instalación se puede conseguir una humedad del producto de salida con valores aproximados entre 0.5% y 2% , mientras que la temperatura del gas de salida puede oscilar entre los 25°C y los 55°C , si bien estos valores de salida están ligados tal como se indica en la figura 14.

Se han considerado distintas zonas de trabajo dentro de esta característica estática, las cuales han sido representadas por puntos de operación indicados por $P1$, $P2$, $P3$, $P4$ y PN (punto nominal de funcionamiento). Por motivos de seguridad, en la instalación no se consideran zonas extremas de trabajo donde el flujo de combustible es bajo y el flujo de producto es alto y viceversa. En el primer caso, se obtendría un alto grado de humedad en el producto a lo largo de todo el cilindro, provocando que las partículas de arena se aglutinen y se adhieran a las paredes, lo que implicaría una excesiva carga para el motor que mueve el cilindro. Por otra parte, en caso de utilizar un alto flujo de combustible y un bajo flujo de producto, las

temperaturas alcanzadas por el gas de secado a la entrada del cilindro excederían los límites permisibles de la instalación.

Los experimentos realizados para la validación del modelo se han llevado a cabo barriendo toda la zona de trabajo del sistema. Así, se han aplicado distintos escalones en las señales de control de manera combinada de forma que se recorran los puntos de funcionamiento indicados anteriormente.

En la figura 15 se ha indicado cuáles han sido las señales de control aplicadas tanto al sistema real como al modelo. La evolución de las señales de control, tal como se expone en la figura 15, es tal que partiendo del punto de funcionamiento *PI*, se aplica un escalón en el flujo de producto a los 150 minutos. Posteriormente, a los 280 minutos se incrementa súbitamente el flujo de combustible, haciendo que el sistema alcance el punto nominal *PN*. A los 450 minutos se vuelve a incrementar el flujo de producto. Finalmente, a los 560 minutos se vuelve a incrementar el flujo de combustible, haciendo que el sistema alcance el punto de funcionamiento *P4*.

En la figura 16 se muestra la evolución temporal de los valores experimentales de la *temperatura de gas* y de la *humedad de producto* obtenidos con las señales de control anteriormente descritas, junto con los valores de simulación proporcionados por el modelo del sistema (implementado en *Dymola* (Elmqvist, H., Brück, D. y Otter, M., 1996)).

El resultado muestra el buen comportamiento del simulador a pesar de imponer unas condiciones de cambio en la entrada bastante severas. Como puede observarse, tanto la ganancia como la dinámica principal del sistema es reproducida por el modelo con gran fidelidad, teniendo en cuenta las perturbaciones a las que está sometida la planta.

8. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado un estudio del comportamiento de secaderos rotatorios basado en el planteamiento de ecuaciones generales básicas con parámetros distribuidos y de correlaciones que permiten sistematizar su modelado. Por otra parte, se han presentado y comentado de forma expresa los ensayos a los que se debe someter al material para la obtención de los flujos de evaporación, variable fundamental en el modelado y de la que normalmente no se tienen datos teóricos.

Se ha tomado como ejemplo una instalación real de secado de arena, de la que se ha realizado un modelo conforme a lo propuesto en el artículo.

Para la validación del modelado, se han comparado resultados de simulación con resultados experimentales obtenidos abarcando toda la zona de trabajo admisible de la instalación. Se ha comprobado que el modelo es capaz de reproducir tanto la ganancia como la dinámica principal del sistema, a pesar de las variaciones bruscas de las señales de control aplicadas, que han hecho posible que el sistema evolucione a las distintas zonas de funcionamiento.

Como líneas futuras de investigación se propone el uso del modelo como herramienta que permita tanto estudios de optimización de funcionamiento, como la obtención de modelos para hacer un control más efectivo.

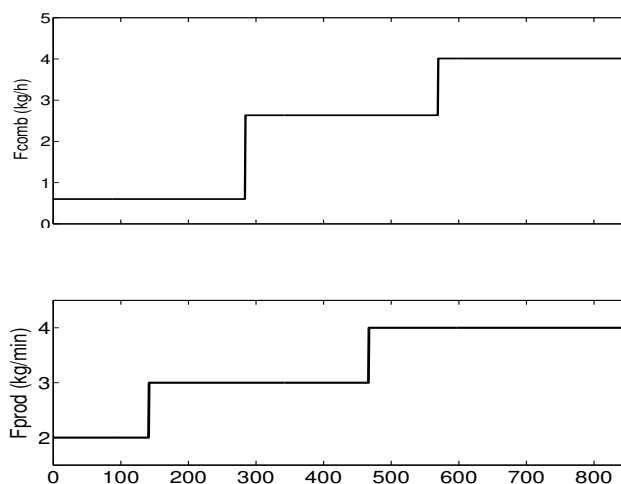


Figura 15. Señales de entrada aplicadas al secadero.

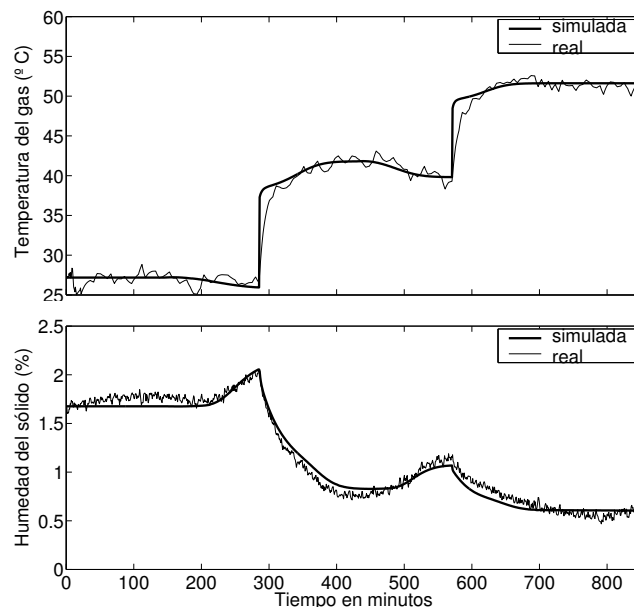


Figura 16. Trayectorias de las salidas de simulación frente a las reales.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo del Ministerio de Ciencia y Tecnología mediante la financiación del proyecto DPI2007-64697.

REFERENCIAS

- Arjona, R. (1997). "Análisis del Proceso de Secado de Alpeorajo". Proyecto Fin de Carrera. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla.
- Arjona, R., García, A., Ollero, P. (1999). "The Drying of Alpeorajo, a Waste Product of the Olive Oil Mill Industry". *Journal of Food Engineering* **41**, 229–234.
- Brasil, G.C., Seckler M.M. (1988). "A Model for the Rotary Drying of Granular Fertilizers". *Proceeding 6th International Drying Symposium* pp. 247–256.
- Britton, P.F., M.E. Sheehan and P.A. Schneider (2006). "A Physical Description of Solids Transport in Flighted Rotary Dryers". *Powder Technology* pp. 153–160.

- Deich, V.G., Stalskii, V.V. (1975). "Optimum Control of Drying Processes in a Rotary Drum Dryer". *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. **9**(1), 85–90.
- Douglas P.L., Kwade, A. Lee, P.L., Mallick, S.K. (1992). "Simulation of a Rotary Dryer for Sugar Crystalline". *Drying Technology* **11**(1), 129–155.
- Duchesne, C., Thibault, J., Bazin, C. (1997). "Modelling and Dynamic Simulation of an Industrial Rotary Dryer". *Dev. Chem. Eng. Mineral Process* **5**(3/4), 155–182.
- Elmqvist, H., Brück, D. y Otter, M. (1996). "Dymola. Dynamic Modeling Laboratory. User's Manual". Dynasim AB.
- Friedman, S.J., Marshall, W.R. Jr. (1949a). "Studies in Rotary Dryer -Part I. Holdup and Dusting". *Chem. Ing. Progress* **45**(8), 482–493.
- Friedman, S.J., Marshall, W.R. Jr. (1949b). "Studies in Rotary Dryer -Part II. Heat and Mass Transfer". *Chem. Ing. Progress* **45**(9), 573–588.
- Liptak, B.G. (1998). "Optimizing Dryer Through Better Control". *Chemical Engineering*.
- Liptak, B.G. (1999). "Optimization of Industrial Processes". CRC Press.
- Lobato, F.S., V. Steffen Jr., E.B. Arruda and M.A.S. Barrozo (2008). "Estimation of Drying Parameters in Rotary Dryers using Differential Evolution". *6th International Conference on Inverse Problems in Engineering: Theory and Practice* **135**, 12063.
- McCormick, P.Y. (1962). "Gas Velocity Effects on Heat Transfer in Direct Heat Rotary Dryers". *Chem. Eng. Progress* **58**, 57–62.
- Myklestad, O. (1963a). "Heat and Mass Transfer in Rotary Dryers". *Chem. Eng. Progress Symp. Series* **59**, 129–137.
- Myklestad, O. (1963b). "Moisture Control in Rotary Dryer". *Chem. Eng. Progress Symp. Series* **59**, 138–144.
- Perry, R.H., Green, D.W. (1997). "Perry's Chemical Engineers Handbook". McGraw-Hill.
- Reay, D. (1979). "Theory in the Design of Dryers". *Chem. Eng.* pp. 501–506.
- Savaresi, S.M., R.R. Bitmead and R. Peirce (2001). "On Modelling and Control of a Rotary Sugar Dryer". *Control Engineering Practice* pp. 249–266.
- Schofield, F.R., Glikin, P. G. (1962). "Rotary Dryers and Coolers for Granular Fertilizers". *Trans. Chem. Eng.* (40), 183–190.
- Sharples, K., Glikin, P.G., Warne, R. (1964). "Computer Simulation of Rotary Dryers". *Transactions of the Institution of Chemical Engineers* **42**, 255–284.
- Sheehan, M.E., P.F. Britton and P.A. Schneider (2005). "A model for Solids Transport in Flighted Rotary Dryers Based on Physical Considerations". *Chemical Engineering Science* pp. 4171–4182.
- Thorpe, G.R. (1972). "The Mathematical Modelling of Dryers". Ph.D. Thesis, University of Nottingham.